



Received: 12-04-2015

Accepted: 26-04-2015

Anales de Edificación

Vol. 1, Nº1, 23-32 (2015)

ISSN: 2444-1309

Doi: 10.20868/ade.2015.3036

Experimental mechanical characterisation of a structural lightweight aggregate concrete Caracterización mecánica experimental de un hormigón ligero estructural

F.I. Olmedo^a, A. Cobo^a, F.B. Díaz^b, F. Navarro^b & M.A. Vidal^b

^a Universidad Politécnica de Madrid (Spain), ^b Lafarge (Spain,)

Abstract—The self load of the structure is usually similar even bigger than any other load which a structure carries. Due to this fact a number of structure are inefficient. The replacement in concrete of normal aggregate by lightweight aggregate reaches a markedly reduction of the concrete weight. The mechanical behavior of a lightweight aggregate concrete is analyzed in this paper. A number of tests have been done at different ages. These results have been compared with the predicted mechanical values of some regulation.

Index Terms— structural Lightweight aggregate concrete; compression; non-destructive testing; modules of elasticity

Resumen—El peso propio de la estructura es habitualmente del mismo orden o superior al de las cargas que tiene que soportar. Esto hace que las estructuras resultantes sean en muchos casos poco eficientes. La sustitución, parcial o total, en un hormigón del árido convencional por otros materiales más ligeros, consigue una reducción notable del peso del hormigón resultante. En este trabajo se analiza el comportamiento mecánico de un hormigón ligero estructural elaborado por Lafarge. Se han realizados ensayos tanto destructivos como no destructivos a distintas edades. Los resultados muestran la evolución de las características mecánicas a diferentes edades, así como su comparación con los valores estimados según distinta normativa.

Palabras clave— hormigón ligero estructural; compresión, ensayos no destructivos, módulo de elasticidad

F.I. Olmedo, estudiante de doctorado en la Escuela de Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, Avda/ Juan de Herrera 6, Madrid, 28040, España (e-mail: fiolmedoz@aparejadoresmadrid.org)

A. Cobo, Catedrático de Escuela Universitaria de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, Avda/ Juan de Herrera 6, Madrid, 28040, España (e-mail: alfonso.cobo@upm.es)

F.B. Díaz, Director de Edificación y Distribución de Lafarge España, C/ Orense, 70, Madrid, 28020, España (e-mail: borja.diaz@lafarge.com)

F. Navarro, Director de Innovación de Lafarge España, C/ Arroyo de la Vega 4 y 6, Alcobendas (Madrid), 28108, España (e-mail: francisco.navarro@lafarge.com)

M.A. Vidal, Responsable de Desarrollo de nuevos productos de áridos y hormigón de Lafarge España, C/ Arroyo de la Vega 4 y 6, Alcobendas (Madrid), 28108, España (e-mail: maria-angeles.vidal@lafarge.com)

I. INTRODUCCIÓN

EL HORMIGÓN LIGERO se comenzó a utilizar en la antigüedad en el Imperio Romano, con obras singulares como el Puerto de Cosa, el Coliseo de Roma (Figura 1) o el Partenón de Agripa (*Bremer, Holm y Stepanova, 1994*).

En estas primeras construcciones, el árido utilizado era de origen volcánico, procedente de las canteras situadas en las inmediaciones de la obra. Este hecho hacía que estos primeros hormigones ligeros solo pudiesen ejecutarse en las inmediaciones de donde estos áridos ligeros naturales estuviesen disponibles. Esta situación unida al retroceso tecnológico que supuso la caída del Imperio Romano, supuso que el empleo del hormigón ligero cayese en desuso durante siglos



Fig. 1 Coliseo de Roma

Tras un largo periodo de inutilización, volvió a usarse a raíz de que Stephen J. Hayde patentara el horno giratorio en 1918 para la expansión de pizarras, esquistos y arcillas para la producción de áridos ligeros de manera industrial. A partir de ese momento, se pudo disponer de áridos ligeros sin depender de la localización de la obra, lo que supuso su popularización (ESCSI, 1971).

A partir de ese momento, lentamente comenzó a popularizarse este tipo de hormigón para todo tipo de usos. Los primeros usos del material consistieron en la construcción de barcos y barcasas para la compañía U.S Emergency Fleet Building Corporation. Estados Unidos estaba inmerso en la Primera Guerra Mundial, y el uso del acero estaba muy restringido fuera del uso militar. Por esta razón, los ingenieros americanos buscaron otros materiales para la construcción de cascos de buques y el hormigón ligero fue la solución.

A partir de los años 40 del siglo 20, comenzó a extenderse su uso a la construcción. A raíz de una proposición de la National Housing Agency, comenzaron a realizarse estudios en diversos laboratorios para caracterizar un número de hormigones con diferentes composiciones y procedencia de los áridos (Kluge, Sparks y Tuma, 1949), (Price y Cordon, 1949).

A partir de estos estudios, el uso del hormigón elaborado con áridos ligeros se extiende a la ingeniería civil. La reconstrucción del puente de Tacoma fue la obra más significativa en este periodo. En la década de los 80 del pasado siglo la industria petrolera comenzó unos estudios encaminados a estimar la viabilidad de este material para la construcción de plataformas petrolíferas en alta mar (Hoff, 1992).

La resistencia del hormigón viene determinada por la resistencia de los materiales que lo componen. A diferencia de los hormigones convencionales, la resistencia de los áridos ligeros suele ser inferior a la del hormigón del que forma parte. También la deformabilidad es muy diferente entre áridos ligeros y convencionales.

Al expandir los áridos, los materiales de origen (arcilla, pizarra o esquistos) aumentan significativamente su porosidad. Cuanto más se expande el árido, más se reduce su densidad, y disminuye su capacidad resistente. Adicionalmente, su

deformabilidad aumenta. Los valores del módulo de elasticidad de los áridos ligeros se encuentran entre $1,45$ y $2,30 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, mientras que los áridos convencionales, se mueven en una horquilla entre $3,00$ y $10,00 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ (Muller-Rochholz, 1979). Combinando ambos conceptos, se puede establecer la resistencia límite de un hormigón. La figura 2 ilustra dicha relación (Schütz, 1970).

La resistencia límite de un hormigón ligero estructural (HLE) indica las máximas resistencias a compresión y a tracción que puede alcanzar un hormigón fabricado con un determinado tipo de árido y una cantidad de cemento razonable. Una dosificación de hormigón está cerca de su resistencia límite cuando dosificaciones similares en las que únicamente varía el incremento de la cantidad de cemento añadida, dan como resultados incrementos de resistencia despreciables.

El factor decisivo en la resistencia límite es el tamaño del árido grueso. Reduciendo el tamaño máximo del árido, se consigue incrementar el valor de la resistencia límite. Cuanto menos resistente y blando sea un árido, este efecto es más apreciable. En una serie de ensayos, para un determinado árido de tamaño máximo $\frac{3}{4}$ ", se alcanzó una resistencia límite de 35 N/mm^2 . Para ese mismo árido, reduciendo el tamaño máximo a $\frac{1}{2}$ ", la resistencia límite se incrementó hasta los 52 N/mm^2 (Meyer y Kahn 2002).

Las tensiones en el hormigón se distribuyen conjuntamente tanto por la matriz de mortero (fase viscosa) como por los áridos (fase sólida). La figura 3 muestra la diferente distribución de tensiones en el material. La proporción en que se distribuyen las tensiones por ambos materiales depende de la proporción entre ambos y de sus resistencias. Conociendo estos valores puede deducirse a partir de este modelo la resistencia esperable del árido, tal como se muestra en (1) (Weigler y Karl, 1974)).

$$\sigma_a = \sigma_m - \frac{\sigma_m - \sigma_c}{\sqrt[3]{V_a^2}} \quad (1)$$

Diferentes estudios realizados sobre distintas tipologías de hormigón ligero, utilizando diferentes tipos de árido y relaciones agua (espacio residual)-cemento muestran la gran variedad de resultados en función de la tipología de los áridos. La figura 4 muestra esta relación (Weigler y Karl, 1974). Si bien en un principio, todos los áridos utilizados eran ligeros, estudios posteriores demostraron los beneficios de la utilización conjunta de áridos ligeros con arena natural (Hanson 1964).

ACI 213R-03 (ACI, 2003) indica que el empleo del HLE en una estructura supone una disminución del coste económico total de la misma. Aunque el HLE tiene un precio superior al de un hormigón convencional (HC), la estructura posee un coste menor debido al ahorro que se produce debido a su menor peso. Numerosos ejemplos del empleo del HLE en tipologías estructurales muy distintas dan fe de la economía obtenida al emplear HLE debido al ahorro en peso de acero y en los cimientos (Wilson, 1981).

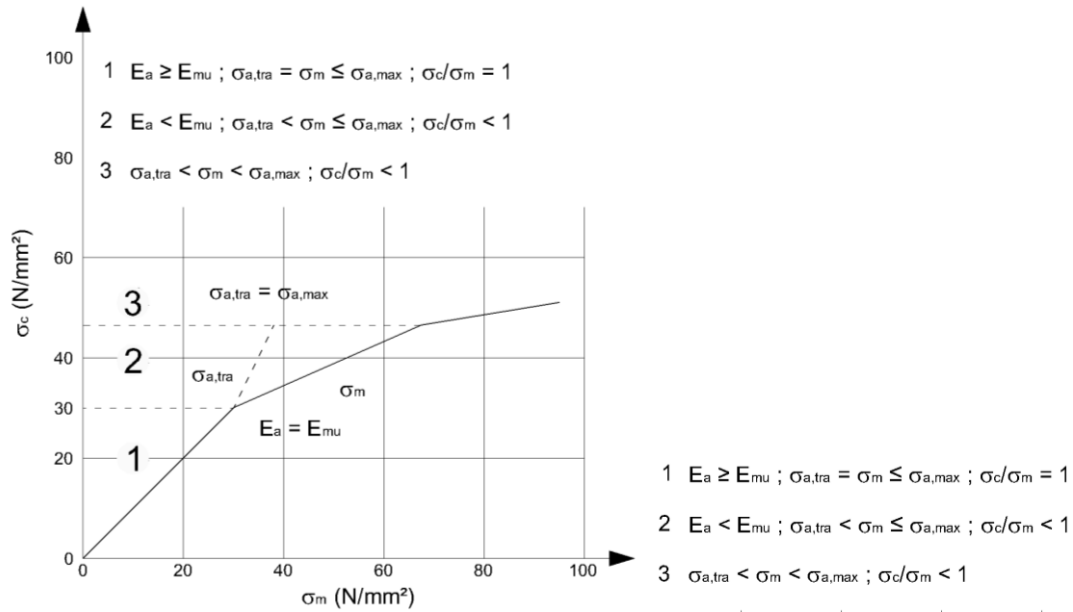


Fig. 2 Resistencia del hormigón en función de la resistencia del mortero y la resistencia límite del árido

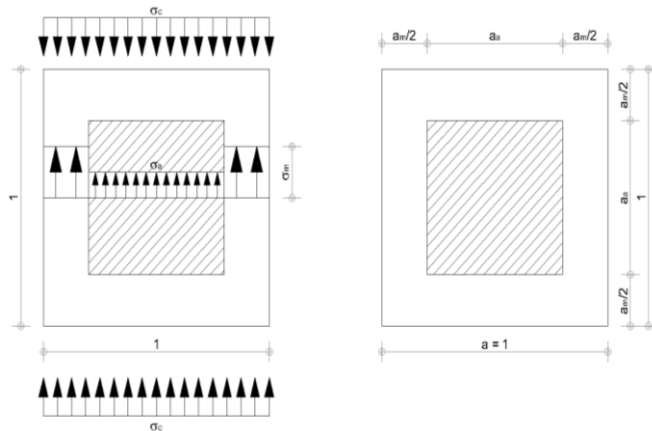


Fig. 3 Modelo estructural del hormigón, para el cálculo de la resistencia de los granos

Kulka y Polinka señalaron que en el hormigón pretensado, las ventajas económicas del HLE son superiores que en el hormigón armado. En muchas ocasiones, la fuerza del pretensado se emplea solo para equilibrar el peso propio de la estructura, por lo que en el caso de estructuras de hormigón pretensado, el empleo de HLE supone un ahorro considerable de acero activo.

En zonas sísmicas, la acción horizontal debida al sismo depende de las cargas muertas, fundamentalmente el peso propio de la estructura. En estos casos, el empleo de HLE supone menores acciones de cálculo con el consiguiente ahorro económico en la estructura. Las mayores aplicaciones del HLE se dan en los elementos y paneles prefabricados, debido a la economía que se obtiene en el manejo, transporte y

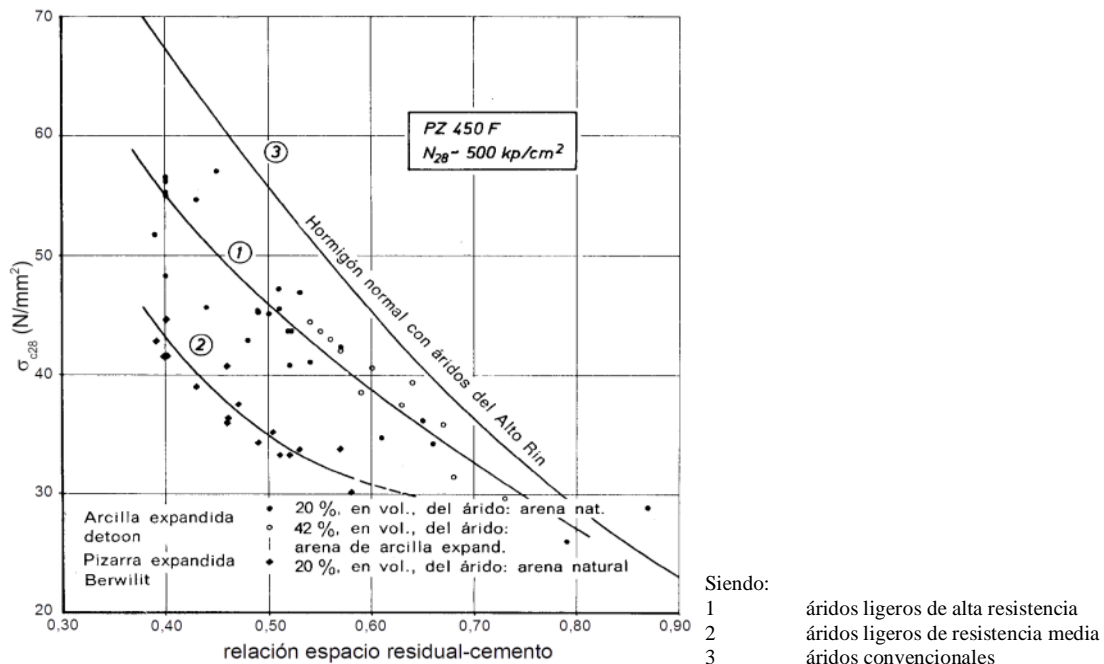


Fig. 4 Relación entre la resistencia a compresión a 28 días del hormigón y el espacio residual-cemento

construcción de estos elementos como consecuencia de su menor peso.

II. OBJETIVOS

Como se ha visto en el punto anterior, la tipología y dosificación concreta de un hormigón ligero, tiene una importancia capital en sus características mecánicas. La misma dosificación usando diferentes áridos, presenta unos parámetros mecánicos muy diferentes. Debido a lo anterior, la utilización estructural de un HLE exige su caracterización mecánica previa.

En el HLE, el mortero es más rígido y resistente que el árido grueso. En el HC ocurre al contrario. Esto supone que algunos aspectos del comportamiento mecánico de un HLE sean distintos a los del HC. En este trabajo se ha efectuado una caracterización mecánica experimental de un HLE con el fin de i) obtener la resistencia a compresión y su módulo de elasticidad, ii) obtener su resistencia a tracción a partir de las resistencias a tracción indirecta y a flexotracción, iii) estudiar la evolución de las propiedades mecánicas anteriores con el tiempo, iv) comprobar la adecuación de la medida indirecta de la resistencia a compresión mediante el esclerómetro y v) verificar si distintos normas son capaces de predecir los valores obtenidos experimentalmente.

III. MATERIALES Y TÉCNICAS EMPLEADAS

A. Materiales empleados

El hormigón empleado corresponde a una amasada realizada el 27 de enero de 2014 en la planta de la empresa LAFARGE en Oviedo, Asturias. Este hormigón pertenece a la gama de productos THERMEDIA. Su denominación según la Instrucción española (Ministerio de Fomento 2008) es HLE-25/P/8/III. Para su fabricación se ha empleado cemento CEM

TABLA I
DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

Material	Tipo	Cantidad
Cemento	CEM III/A-42,5 NSR (TUDELA VEGUIN)	546 Kg
Arena	0/4 Densidad 700 Kg/m ³	---
Árido	4/8 Densidad 650 Kg/m ³	---
Aditivo 1	Superplastificante (PCP)	0,75%
Aditivo 2	Plastificante	1,50%
R a/c		0,45

III/A-42,5 NSR fabricado por LAFARGE, y un árido 4/8 Densidad 650 Kg/m³, suministrado por Weber. La dosificación concreta del hormigón se muestra en la tabla I:

Para la caracterización mecánica del hormigón se han realizado ensayos a compresión, tracción indirecta y flexotracción. Con el objetivo de comprobar la evolución en el tiempo de las características mecánicas del HLE, los ensayos se han realizado a las edades de 7, 14 y 28 días. En la tabla II se muestran los ensayos que se han realizado sobre cada probeta, las edades, denominaciones y pesos de las probetas ensayadas. En las filas se indican las probetas ensayadas con una nomenclatura del tipo LX α - β ; donde L indica hormigón

ligero; X el tipo de ensayo efectuado sobre la probeta (CB-compresión, T- tracción indirecta, F- flexotracción); α la edad del ensayo en días, 7, 14, 28) y β es el número de la probeta. En las columnas se indican para cada probeta el tipo de ensayo efectuado, su geometría, dimensión, densidad y peso.

B. Ensayos realizados

1) Ensayos destructivos

De cada tipología de probetas, y para las edades contempladas en el estudio, 7, 14 y 28 días, se han roto tres probetas a compresión, tres probetas a tracción indirecta y dos probetas a flexotracción. Para cada grupo de tres probetas, aleatoriamente se monitorizaba una de ellas con galgas extensométricas para obtener las deformaciones longitudinales y transversales.

Las probetas se han ensayado, según corresponda, conforme a las normas UNE-EN12390-3 2009 (AENOR, 2009a), UNE-EN12390-5 2009 (AENOR, 2009b) y UNE-EN12390-6 2010 (AENOR, 2010). Todas las pruebas se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid. La prensa utilizada ha sido del tipo universal IBERTEST MIB60-AM equipada con software WINTTEST 32.

2) Ensayos no destructivos

Todas las probetas ensayadas en la prensa han sido previamente testadas de forma no destructiva para caracterizar sus propiedades mecánicas de forma indirecta. El método empleado ha sido el esclerómetro. Las probetas se han ensayado conforme a la norma UNE-EN12504-2 (AENOR, (2013).

Para la determinación del índice de rebote se ha usado un Esclerómetro fabricado por A. EISENHUT modelo N. De cada una de las probetas se realizaban 9 medidas sobre dos de las caras de la probeta.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

A. Ensayos destructivos

En la Tabla III se muestran los valores obtenidos en los ensayos destructivos efectuados. Se han indicado la tensión máxima alcanzada en los tres tipos de ensayo y el módulo de elasticidad longitudinal y la deformación unitaria para la carga máxima en el ensayo a compresión.

En la figura 5 se muestran los valores medios de las resistencias alcanzadas en los ensayos de compresión, flexotracción y tracción indirecta, para cada una de las edades estudiadas. En la figura 6 se muestra la evolución del modulo de elasticidad con la edad.

B. Ensayos no destructivos

Esclerómetro

De las lecturas obtenidas se obtienen, según las tablas del esclerómetro utilizado, las tensiones estimadas de rotura a compresión. En la Tabla IV se indican las tensiones de rotura obtenidas en el ensayo a compresión (σ_{\max}) y la tensión de rotura estimada mediante el esclerómetro (σ_{est}).

TABLA II
DENOMINACIÓN, EDAD, DIMENSIONES, PESOS, DENSIDADES Y TIPO DE ENSAYO DE LAS PIEZAS DE ENSAYO

Probeta	Tipo Probeta	A mm	B mm	H mm	Peso kg	Densidad kg/m ³	Compresión	Flexotracción	Tracción indirecta
LACB-7-1	Cilíndrica	150	-	300	8,02	1512,84	x		
LACB-7-2	Cilíndrica	150	-	300	8,05	1519,06	x		
LACB-7-3	Cilíndrica	150	-	300	7,95	1499,63	x		
LACB-14-1	Cilíndrica	150	-	300	7,99	1508,12	x		
LACB-14-2	Cilíndrica	150	-	300	8,00	1509,82	x		
LACB-14-3	Cilíndrica	150	-	300	8,03	1514,91	x		
LACB-28-1	Cilíndrica	150	-	300	8,02	1513,03	x		
LACB-28-2	Cilíndrica	150	-	300	8,09	1526,80	x		
LACB-28-3	Cilíndrica	150	-	300	7,98	1506,61	x		
LAF-7-1	Prismática	150	150	600	20,50	1518,52		x	
LAF-7-2	Prismática	150	150	600	20,48	1517,56		x	
LAF-14-1	Prismática	150	150	600	20,40	1511,11		x	
LAF-14-2	Prismática	150	150	600	20,39	1510,74		x	
LAF-28-1	Prismática	150	150	600	20,45	1514,81		x	
LAF-28-2	Prismática	150	150	600	20,41	1511,85		x	
LAT-7-1	Cilíndrica	150	-	300	8,03	1514,91			x
LAT-7-2	Cilíndrica	150	-	300	8,02	1513,03			x
LAT-7-3	Cilíndrica	150	-	300	8,09	1526,80			x
LAT-14-1	Cilíndrica	150	-	300	7,98	1506,61			x
LAT-14-2	Cilíndrica	150	-	300	8,02	1512,84			x
LAT-14-3	Cilíndrica	150	-	300	8,05	1519,06			x
LAT-28-1	Cilíndrica	150	-	300	7,95	1499,63			x
LAT-28-2	Cilíndrica	150	-	300	7,99	1508,12			x
LAT-28-3	Cilíndrica	150	-	300	8,00	1509,82			x

TABLA III
RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Probeta	Compresión			Tracción indirecta	Flexotracción
	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ_{\max} (‰)	E (N/mm ²)		
LACB-7-1	19,93	1,83	10839,63	-	-
LACB-7-2	26,57	2,63	10086,69	-	-
LACB-7-3	22,99	2,11	10873,77	-	-
LACB-14-1	23,60	2,13	11054,57	-	-
LACB-14-2	26,73	2,52	10594,61	-	-
LACB-14-3	26,53	2,35	11288,08	-	-
LACB-28-1	-	-	-	-	-
LACB-28-2	24,27	1,97	12437,50	-	-
LACB-28-3	26,93	2,78	9852,05	-	-
LAF-7-1	-	-	-	-	-
LAF-7-2	-	-	-	5,26	-
LAF-14-1	-	-	-	7,94	-
LAF-14-2	-	-	-	7,24	-
LAF-28-1	-	-	-	8,34	-
LAF-28-2	-	-	-	8,66	-
LAT-7-1	-	-	-	-	2,34
LAT-7-2	-	-	-	-	1,94
LAT-7-3	-	-	-	-	2,07
LAT-14-1	-	-	-	-	2,53
LAT-14-2	-	-	-	-	2,31
LAT-14-3	-	-	-	-	2,80
LAT-28-1	-	-	-	-	-
LAT-28-2	-	-	-	-	2,65
LAT-28-3	-	-	-	-	2,52

*- Problemas durante el ensayo arrojaron valores no aceptables

TABLA IV
RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE ESCLERÓMETRO

Probeta	σ_{\max} (N/mm ²)	σ_{est} (N/mm ²)
LACB-7-1	19,93	15,10
LACB-7-2	26,57	13,25
LACB-7-3	22,99	*
LACB-14-1	23,60	13,80
LACB-14-2	26,73	15,10
LACB-14-3	26,53	12,50
LACB-28-1	-	14,55
LACB-28-2	24,27	14,55
LACB-28-3	26,93	15,90
LAF-7-1	-	19,50
LAF-7-2	-	20,15
LAF-14-1	-	18,00
LAF-14-2	-	21,00
LAF-28-1	-	22,50
LAF-28-2	-	23,35
LAT-7-1	-	13,25
LAT-7-2	-	13,25
LAT-7-3	-	13,80
LAT-14-1	-	14,55
LAT-14-2	-	14,55
LAT-14-3	-	15,35
LAT-28-1	-	17,35
LAT-28-2	-	14,60
LAT-28-3	-	14,55

*- Problemas durante el ensayo arrojaron valores no aceptables

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

A. Evolución de las resistencias a compresión con la edad

El Código Modelo (CEB-FIB, 2010) estima el valor de la resistencia media a compresión a una edad de t días, a partir de la resistencia media a compresión a 28 días, según la expresión (2):

$$f_{cm(t)} = \beta_{cc(t)} \cdot f_{cm} \quad (2)$$

$$\beta_{cc(t)} = \exp \left\{ s_c \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\}$$

Siendo:

$f_{cm(t)}$: Resistencia media a compresión en MPa a la edad de t días

f_{cm} : Resistencia media a compresión en MPa a los 28 días

β_{cc} : Coeficiente que depende de la edad del hormigón

t : Edad del hormigón en días (debe ajustarse en función de la temperatura de curado según tabla 5.1-85 de CEB-FIB, 2010)

s_c : Coeficiente dependiente de la clase de cemento, según tabla 5.1-9. En este caso, $s_c = 0,25$

Para el caso concreto de hormigón con áridos ligeros, se especifica que el coeficiente s_c ha de sustituirse por s_{lc} , con los valores de 0,05 para áridos de alta resistencia, y 0,25 para áridos de baja resistencia.

La Instrucción Española (EHE), basándose en el Código Modelo, estima el valor de la resistencia a compresión a una edad de t días ($f_{cm(t)}$), a partir de la resistencia media a compresión a 28 días, según la fórmula (3):

$$f_{cm(t)} = \beta_{cc(t)} \cdot f_{cm} \quad (3)$$

$$\beta_{cc(t)} = \exp \left[\frac{s(1 - 28/t)}{2} \right]$$

Siendo:

f_{cm} : Resistencia media a compresión obtenida mediante ensayo a los 28 días

β_{cc} : Coeficiente que depende de la edad del hormigón

t : Edad del hormigón en días

s : Coeficiente que depende de la velocidad de endurecimiento del cemento. En este caso, $s = 0,2$

En este caso, la EHE, no hace distinción entre la utilización de hormigones normales y ligeros.

En la tabla V y en la figura 7 se comparan los resultados experimentales obtenidos para la resistencia media a compresión a distintas edades con los resultados deducidos a partir de las expresiones del Código Modelo y la EHE.

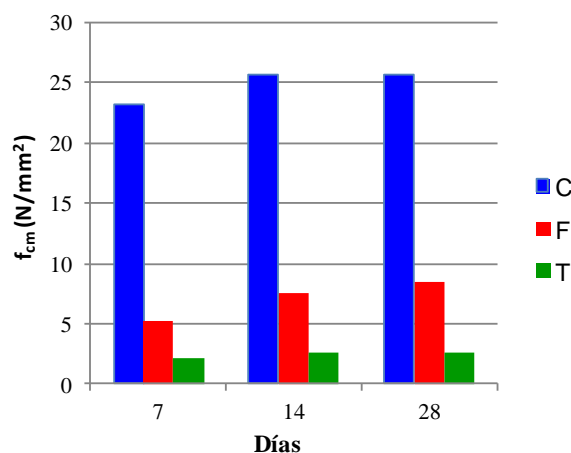


Fig. 5. Valores medios de los ensayos de la resistencia a compresión (C), flexotracción (F) y tracción indirecta (T).

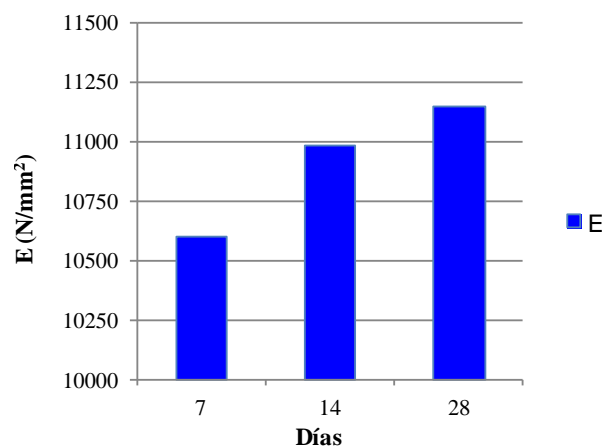


Fig. 6. Valores del módulo de elasticidad longitudinal, E, en función de la edad

A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que existe una buena correlación entre los valores reales de los ensayos y los valores previstos en el Código Modelo. La mayoría de los valores obtenidos se encuentran en un intervalo del 5% del valor previsto por la norma, salvo el valor correspondiente a los 7 días que apenas excede esa diferencia al ser del 5,12 %. No puede afirmarse que los valores

TABLA V
RESISTENCIA MEDIA A COMPRESIÓN A DIFERENTES EDADES OBTENIDA
EXPERIMENTALMENTE Y ESTIMACIÓN DEL VALOR CON EL CÓDIGO MODELO
Y LA EHE

Edad (días)	7	14	28
Experimental			
f_{cm} (MPa)	23,17	25,62	25,61
f_{ck}	22,98	25,53	25,52
Δ_{28d}	-9,51%	0,06%	0,00%
CEB-FIB-10			
$f_{cm(t)}$ (MPa)	24,36	25,08	25,61
$\Delta(\%)$	-5,14%	2,11%	0,00%
EHE-08			
$f_{cm(t)}$ (MPa)	18,97	23,17	25,61
$\Delta(\%)$	18,13%	9,56%	0,00%

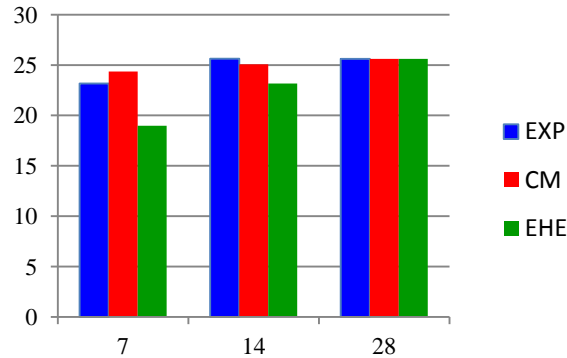


Fig. 7. Comparación de la resistencia media a compresión a diferentes edades y la prevista en el Código Modelo y la EHE obtenidos se sitúan preferentemente por encima o por debajo

de los deducidos.

Por el contrario, no se puede afirmar que exista una correlación entre los valores experimentales y los deducidos a través de la EHE. Todos los valores deducidos difieren sustancialmente del valor experimental, situándose en todos los casos las resistencias obtenidas en los ensayos muy por encima de la estimación. Los valores obtenidos a través de esta normativa quedan muy del lado de la seguridad.

B. Módulo de deformación longitudinal E

A partir de los valores de la resistencia a compresión y/o de la densidad del hormigón, puede estimarse el módulo de elasticidad longitudinal. En este trabajo se han considerado los valores indicados por las siguientes normativas o reglamentos: China Profesional Estándar (JGJ 51, 2002), American Concrete Institute (ACI 318, 2003), Institute of Structural Engineers (ISE, 1987) y el Código Modelo (CEB-FIB, 2010).

TABLA VI
RESISTENCIA A COMPRESIÓN A DIFERENTES EDADES, Y ESTIMACIÓN DEL VALOR A DIFERENTES EDADES A PARTIR DE LA RESISTENCIA MEDIA

r	1511,33			
f _c	25,61			
E _{experimental}	11,14			
	JGJ51-2002	ACI 318-95	ISE	FIB-CM10
E	15,45	12,79	11,56	15,20
D(%)	38,69%	14,81%	3,77%	36,45%

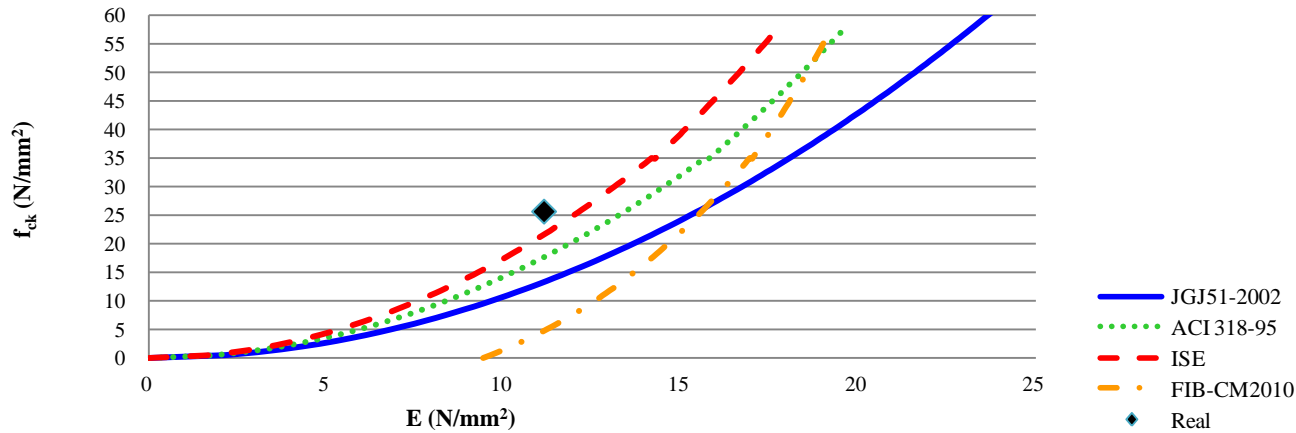


Fig. 8. Previsión de la evolución del módulo de elasticidad, E, para una densidad de 1511,33 kg/m³, en función de la resistencia media, f_{cm} , según diferente normativa.

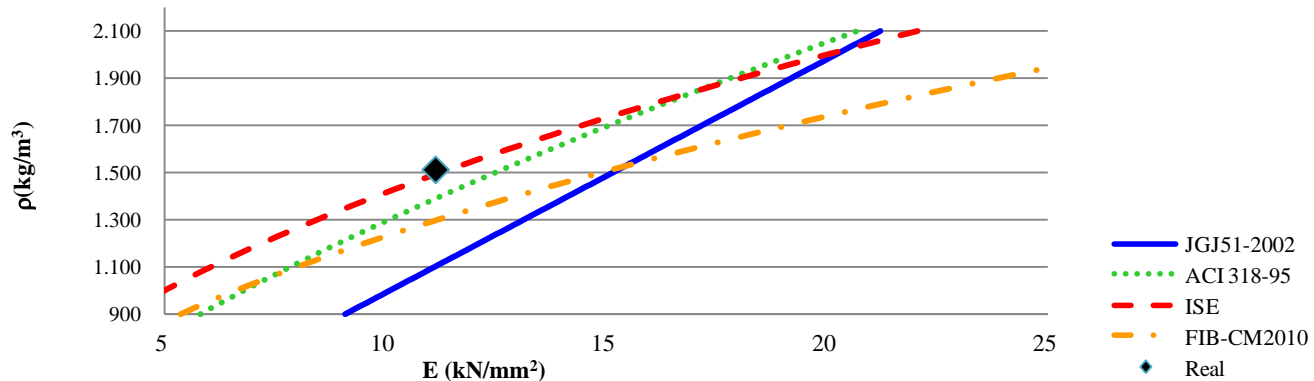


Fig. 9. Previsión de la evolución del módulo de elasticidad, E, para una la resistencia media, f_{cm} , de 25,61 N/mm², en función de la densidad, ρ , según diferente normativa.

TABLA VII
VALORES DE E SEGÚN VARIOS NORMATIVAS

$E = 2,02 \rho \sqrt{f_{cm(cub)}}$	(4)	(JGJ 51, 2002)
$E = 0,043 \sqrt[3]{\rho^2} \sqrt{f_{cm(cil)}}$	(5)	(ACI 318 2003)
$E = 10^6 \rho^2 \sqrt{f_{cm(cub)}}$	(6)	(ISE 1987)
$E = 21,5 \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \sqrt[3]{\frac{f_{cm(cil)} + 8}{10}}$	(7)	(CEB-FIB 2010)

Siendo:

E: Módulo de deformación longitudinal (MPa)

ρ : Densidad del hormigón (Kg/m³)

$f_{cm(cub)}$: Resistencia media a compresión los 28 días en probeta en probeta cúbica (MPa)

$f_{cm(cil)}$: Resistencia media a compresión a los 28 días en probeta en probeta cilíndrica (MPa)

En la tabla VI se muestran las expresiones indicadas por las normas anteriores. (Cui, Lo, Memon, , Xing y Shi, 2012). En este caso no se tiene en cuenta la EHE, debido a que su formulación para hormigón ligero coincide con la establecida en el Código Modelo.

En la tabla VII y las figuras 8 y 9 se comparan los resultados reales obtenidos, con los valores deducidos de la normativa tomada en consideración. En el primer caso, fijando la densidad de la muestra, mientras que en el segundo se fija la resistencia media a compresión. En ambos casos se han tomado los valores a 28 días.

A la vista de los valores obtenidos, la deducción del valor del módulo de elasticidad según el ISE es el que más se aproxima al valor experimental obtenido en los ensayos, con una diferencia de apenas un 3,77 %. El resto de los valores difieren en gran medida del valor experimental, siempre estando por encima del 10%, llegando casi al 40% en el caso de la JGJ51-2002. En todos los casos, los valores estimados son superiores al valor experimental.

C. Resistencia a tracción

La resistencia tracción de un hormigón puede calcularse mediante ensayos de flexotracción, $f_{ct,fl}$, o de tracción indirecta, $f_{ct,sp}$. Los valores obtenidos por estos procedimientos hay que multiplicarlos por un factor de corrección para obtener el valor de la resistencia a tracción. En la expresión (8) se indican los valores correspondientes.

$$A_{sp} = 1$$

$$A_{fl} = \frac{\alpha_{fl} \cdot h_b^{0,7}}{1 + \alpha_{fl} \cdot h_b^{0,7}} \quad (8)$$

Siendo:

h_b : canto de la probeta (mm)

α_{fl} : 0,06

En caso de no disponer de estos valores, el Código Modelo establece el valor medio de la resistencia a tracción, f_{ctm} , a partir de la resistencia característica a compresión, f_{ck} , según (9).

$$f_{ctm} (\leq 50) = 0,3(f_{ck})^{2/3} \quad (9)$$

$$f_{ctm} (> 50) = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot (f_{ck} + \Delta f))$$

Siendo:

f_{ctm} : Resistencia media del hormigón a tracción (MPa)

Δf : 8 MPa

En el caso de hormigón ligero, hay que multiplicar el valor obtenido por el factor η_1 , según (10).

$$\eta_1 = (0,4 + 0,6 \cdot \rho / 2200) \quad (10)$$

TABLA VIII
RESISTENCIA EXPERIMENTAL A TRACCIÓN A DIFERENTES EDADES, Y ESTIMACIÓN DE SU VALOR A DIFERENTES EDADES A PARTIR DEL CÓDIGO MODELO

Edad (días)	7	14	28
Ensayo $f_{ctm,fl}$ (MPa)	2,12	2,55	2,59
Ensayo $f_{ctm,sp}$ (MPa)	5,26	7,59	8,50
CEB-FIB-10			
f_{ctm} (MPa)	3,51	5,06	5,67
$\Delta(\%)$	-65,57%	-98,43%	-118,92%

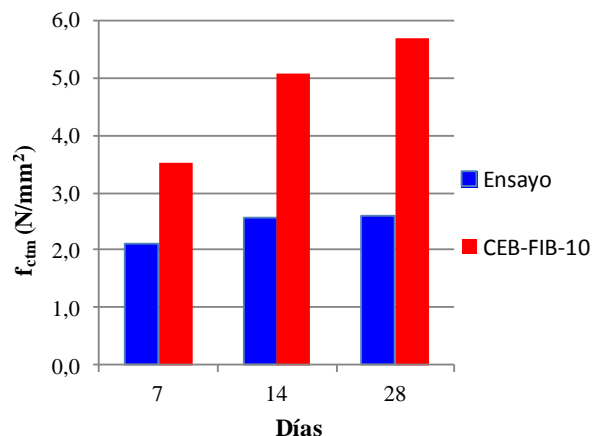


Fig. 10. Comparación de la resistencia a tracción a diferentes edades y la prevista en el Código Modelo a partir del ensayo de flexotracción.

La resistencia a tracción se ha medido de forma indirecta a partir de la resistencia a tracción indirecta y de la resistencia a flexotracción. En la tabla VIII se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción indirecta y flexotracción a las edades de 7, 14 y 28 días. Se indican los valores de la tensión máxima alcanzada en el ensayo y la estimación de la

resistencia a tracción del Código Modelo a partir de la resistencia a compresión, según la expresión (9):

La figura 10 muestra una comparación, a distintas edades, entre el valor de resistencia a tracción obtenido experimentalmente y el valor obtenido a partir de la determinación del Código Modelo. Para todas las edades, el valor estimado por el Código Modelo a partir de la resistencia a flexotracción es muy superior a la estimación directa por el ensayo a flexión indirecta. En el más favorable de los casos, el valor es superior al 65%.

En la tabla IX se indican los valores de la resistencia a tracción f_{ctm} , a obtenidos experimentalmente y los deducidos con las expresiones del Código Modelo y la EHE a partir de la resistencia media a compresión (f_{cm}).

La determinación de la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión presenta resultados muy variables según la referencia que se tome. La figura 11 muestra una comparación a distintas edades de los valores de la resistencia a tracción obtenidas experimentalmente y estimadas por el

TABLA IX
RESISTENCIA EXPERIMENTAL A TRACCIÓN A DIFERENTES EDADES, Y ESTIMACIÓN DEL VALOR POR EL CÓDIGO MODELO Y LA EHE

Edad	7	14	28
Ensayo $f_{ctm,sp}$ (MPa)	2,12	2,55	2,59
CEB-FIB-10			
f_{ctm} (MPa)	1,72	1,99	1,99
$\Delta(\%)$	18,87%	21,96%	23,17%
EHE-08			
f_{ctm} (MPa)	2,12	2,45	2,46
$\Delta(\%)$	0,00%	3,92%	5,02%

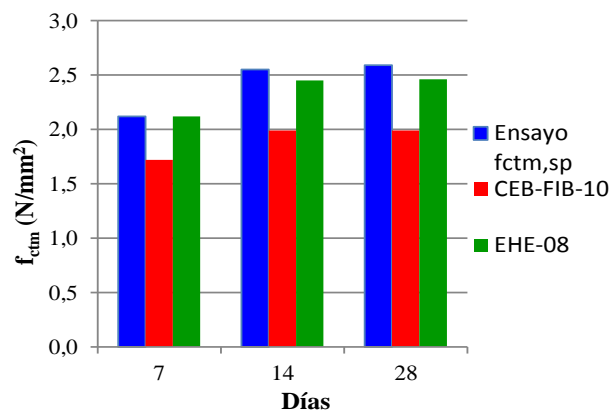


Fig. 11. Comparación de la resistencia a tracción a diferentes edades y la prevista en el Código Modelo y la EHE

Código Modelo y la EHE. Los valores estimados con la EHE presentan una mejor aproximación que los deducidos por el Código Modelo. La diferencia entre los valores deducidos por la EHE y el ensayo de tracción indirecta difiere en menos del 5% en todos los casos. En cambio, los valores deducidos por el Código Modelo son en todos los casos superiores al 18%. En ambos casos, la aproximación es mayor cuanto más temprana es la edad del hormigón.

D. Relación densidad/parámetros resistentes

TABLA X
RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD, R, Y LOS DIFERENTES PARÁMETROS RESISTENTES

Edad (días)	7	14	28
C/Den	0,01529	0,01695	0,01694
F/Den	0,01021	0,01032	0,01136
T/Den	0,00347	0,00502	0,00562

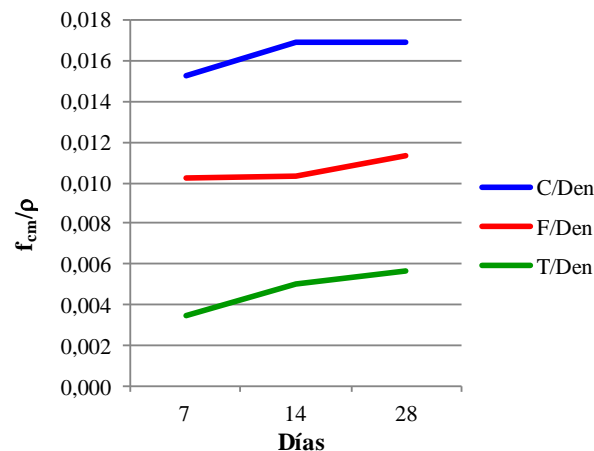


Fig. 12. Evolución de la relación entre la densidad, ρ , y diferentes parámetros resistentes, f_{cm} , $f_{cm,fl}$ y $f_{ctm,sp}$.

En la tabla X, se muestran las relaciones entre la densidad y los diferentes parámetros resistentes estudiados en este trabajo.

La relación entre la densidad y los parámetros resistentes en general aumenta ligeramente con la edad, según se muestra en la figura 12. Tanto la resistencia a compresión como a tracción indirecta, aumenta muy marcadamente a las primeras edades,

TABLA XI
RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN OBTENIDA MEDIANTE EL ENSAYO EN PRENSA Y LA ESTIMADA POR EL ÍNDICE DE REBOTE

Dato	7	14	28
Ensayo $f_{cm,sp}$	23,17	25,62	25,61
C_{esc}	15,47	15,61	17,17
$\Delta(\%)$	33,23%	39,09%	32,95%

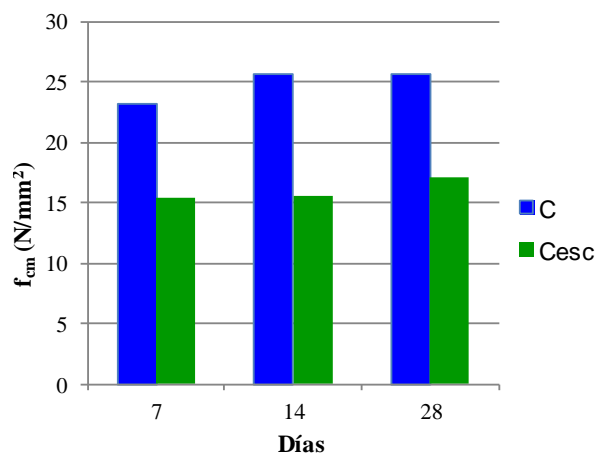


Fig. 13. Resistencia obtenida en el ensayo a compresión, comparada con el ensayo de esclerómetro para diferentes edades.

y posteriormente se estabiliza. En cambio, la flexotracción se mantiene estable en las edades más tempranas para luego crecer.

E. Esclerómetro

Los valores de la resistencia a compresión obtenidos experimentalmente se han comparado con los valores deducidos a partir del índice de rebote. En la tabla XI y la figura 13 se indican los resultados obtenidos.

El índice de rebote depende muy marcadamente de la dureza superficial del hormigón. Las tablas suministradas por los fabricantes están calibradas para HC donde el árido grueso es una grava mucho más rígida que los áridos empleados en un HLE. Por esta razón, la medida efectuada con el esclerómetro empleando el procedimiento habitual, infravalora significativamente la resistencia a compresión real. A partir de los datos obtenidos en este trabajo, se podría indicar que sería necesario incrementar en aproximadamente un 30% la estimación de la resistencia obtenida con el esclerómetro para obtener valores más acordes con los reales.

VI. CONCLUSIONES

Los valores característicos de todos los parámetros resistentes están muy próximos al valor medio. Todos los ensayos cuentan con un coeficiente de variación muy bajo, en la mayoría de los casos inferior al 10%. Esto indica que la dosificación de hormigón ligero estudiada tiene muy poca variabilidad.

El endurecimiento del hormigón es muy rápido. A los 7 días ofrece una resistencia a compresión apenas un 10% inferior a la obtenida a los 28 días. Es más, el valor a los 14 días es ligerísimamente superior al obtenido a los 28 días. La diferencia tan pequeña se debe a la variabilidad de la muestra. La estimación de la resistencia media a compresión mediante las expresiones del Código Modelo ofrece resultados muy similares a los obtenidos experimentalmente. Cuando la estimación se realiza con las expresiones de la EHE, los valores deducidos quedan muy del lado de la seguridad.

La deformabilidad del hormigón es ligeramente superior a lo estimado por cualquiera de las normativas que consideran la densidad en sus cálculos. El valor del módulo de elasticidad, determinado por el ISE, es prácticamente igual al obtenido en los ensayos, apenas un 3% superior.

La resistencia a flexotracción obtenida experimentalmente es mucho menor a la prevista por el Código Modelo a partir de la resistencia a compresión.

La resistencia a tracción indirecta presenta unos valores más próximos entre los obtenidos a través del ensayo, y los deducidos a partir de la normativa. El Código Modelo establece una reducción de la resistencia por tratarse de un hormigón ligero frente a un hormigón de densidad normal. Por el contrario, la instrucción española, EHE, no hace tal distinción. Los valores obtenidos de esta manera, presentan un valor mucho más próximo a los obtenidos directamente de los ensayos. La alta dosificación en cemento respecto a un hormigón convencional de la misma resistencia característica puede ser la responsable de esta disparidad.

Debida a la menor dureza de los áridos empleados en un HLE, la estimación de la resistencia a compresión mediante el

esclerómetro ofrece valores que son aproximadamente un 30% menores a los obtenidos experimentalmente.

VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda suministrada por la empresa LAFARGE para la realización de los ensayos.

REFERENCIAS

- Bremner, T.W.; Holm, T.A.; and Stepanova, V.F. (1994) *Lightweight Concrete – Proven Material for Two Millennia*. Proceedings of Advances in Cement and Concrete, S.Sarkar and M. W. Grutzeck Eds. University of New Hampshire, Durham. S.C. pp 37-41
- ESCSI, (1971) *Lightweight Concrete, History, Applications, Economy*. Expanded SHLEe Clay and Slate Institute, Washington, D.C.,
- Kluge, R.M.; Sparks, M.M.; and Tuma, E.C., (1949) *Light weighting Aggregate Concrete* ACI Journal, Proceedings V.45, N° 5, May pp. 625-642
- Price, W. H.; Cordon, W. A., (1949), *Tests of Lightweight-Aggregate Concrete Designed for Monolithic Construction* ACI JOURNAL, Proceedings V. 45, pp. 581-600.
- Hoff, G.C. (1992) *High Strength Lightweight Aggregate Concrete for Artic Application – Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance*, SP-136 T.A. Holm and A.M. Vaysburd, eds. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. Pp1-245
- Muller-Rochholz, J., (1979) *Determination of the Elastic Properties of Lightweight Aggregate by Ultrasonic Pulse Velocity Measurements* - International Journal of Lightweight Concrete, V.I., N° 2, Lancaster, UK
- Schütz, F.R., - *Der Einfluss der Zuschlagelastizität auf die Betondruckfestigkeit*. Tesis. TH Aachen. 1970
- Meyer, K.F., and Kahn, L.F. (2002) *Transfer and Development Length of High Strength Lightweight Concrete* ACI Symposium on High Performance Structural Lightweight Concrete. Phoenix. Arizona. October 2002
- Weigler, H.; and Karl, S. (1974) *Stahlleibbeton*. (Traducción al castellano "Hormigones ligeros armados" por Amposta, J.M.; y Arenas, A.) Bauverlag GmbH, Wiesbaden (Para la traducción castellana Ed. Gustavo Gili, s.a., Barcelona)
- Hanson, J.A., (1964) *Replacement of Lightweight Aggregate Fines with natural Sand in Structural Concrete* - ACI Journal, Proceedings V. 58 N° 1, pp. 779-793
- Wilson, H.S., (1981) "Progress in Concrete", Malhotra V.M. d. CANMET, Ottawa p.p. 141-187
- AENOR., (2009a) UNE-EN12390-3 - "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3 Determinación de la resistencia a compresión de probetas"
- AENOR., (2009b) UNE-EN12390-5 - "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5 Resistencia a flexión de probetas"
- AENOR., (2010) UNE-EN12390-6 - "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6 Resistencia a tracción indirecta de probetas"
- AENOR., (2013) UNE-EN-12504_2 "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2. Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote"
- CEB-FIP, (2010) CEB-FIP "Model Code" Comité Euro-International du Béton, Lausanne, Switzerland
- Ministerio de Fomento, (2008) EHE-08 "Instrucción de Hormigón Estructural", B.O.E. 22-AGO-08, REAL DECRETO 1247/2008.
- Cui, H.Z.; Lo, T.Y.; Memon, S.A.; Xing, F. & Shi, X.(2012) *Analytical model for compressive strength, elastic modulus and peak strain of structural lightweight aggregate concrete* – Construction and Building Materials 36 pp. 1036-1043
- JGJ 51, (2002) "Technical specification for lightweight aggregate concrete" China Professional standard
- ACI 318, (2003) "Building Code requirement for structural concrete commentary" American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan EEUU
- The Institution of Structural Engineers, (1987) IStructE "Guide to the structural use of lightweight aggregate concrete", The Concrete Society